УДК: 504.054:574.3:528.8 **DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-325-345**

В.И. Кравцова[1], **О.М. Железный**[2]

ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА ПОД ВЛИЯНИЕМ АЭРОТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется трансформация растительности, деградировавшей на значительных площадях под воздействием аэротехногенного загрязнения Норильского металлургического комбината. Для оценки современного состояния экосистем использована карта растительности, составленная по медианным композитам снимков со спутника Sentinel 2B за летний период 2015–2021 гг. с учетом данных полевого обследования региона группой сотрудников МГУ в 2021 г. Анализ трансформации растительности за время действия горно-металлургического комбината основан на сравнении этой карты с материалами полевых исследований той же группы в 1997 г. и классификацией растительности по снимку Landsat 1995 г., при учете более ранних материалов – топографических карт 1960 и 1977 гг., – и данных лесопатологических обследований 1980-х гг. Для сравнения с менее подробными материалами прошлых лет карта 2015–2021 гг. была преобразована: по ней выделены однотипные мозаики контуров, что дало основу для определения районов с близким характером аэротехногенного воздействия на растительность. Такие районы затем объединены в экспозиционные профили; это позволило выполнить анализ трансформации растительности на разном расстоянии от комбината и в разных направлениях в соответствии с розой ветров. Выявлено последовательное замещение погибших лесов кустарниковой и кустарничковой тундрой, деградированной кустарничковой тундрой, техногенными травянистыми и каменистыми пустошами. Ряды замещения варьируются в различных направлениях от комбината. Образовавшиеся на месте погибших лесов травянистые пустоши распространены на расстоянии от 3 км к СВ до 10–15 км к СЗ и З и до 25 км к ЮВ от Норильска. Наблюдаемое при современном потеплении климата развитие растительности неодинаково в различных зонах замещения погибших лесов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промышленное воздействие, динамика растительности, картографирование, космические снимки

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **valentinamsu@yandex.ru**

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **olegzhelezn@gmail.com**

Valentina I. Kravtsova[1], **Oleg M. Zheleznyy**[2]

VEGETATION DYNAMICS OF THE NORILSK INDUSTRIAL REGION UNDER THE INFLUENCE OF AEROTECHNOGENIC AND NATURAL FACTORS

ABSTRACT

This study focuses on the transformation of vegetation, degraded over vast areas due to industrial air pollution from the Norilsk metallurgical combine. To assess the current state of ecosystems, we employed a vegetation map that was compiled using median composites of summer imagery 2015–2021 from the Sentinel 2B satellite. The field data collected by a team of geographers from Moscow State University in 2021 was also considered. The analysis of the transformation of vegetation during the operation of the mining and smelting plant is based on a comparison of the vegetation map with the materials of field studies of the same team in 1997 and the vegetation classification based on Landsat images from 1995, taking into account earlier materials such as topographic maps of 1960 and 1977, and forest pathological surveys of the 1980s. For comparison with less detailed materials of previous years, the 2015–2021 map was transformed: similar mosaics of contours were identified on it. This provided the basis for identifying areas with a similar character of vegetation disturbance caused by industrial air pollution. Such areas were then combined into exposure profiles, which allowed us to analyze the transformation of vegetation at different distances and directions from the plant – in accordance with the prevalent winds. The successive replacement of dead forests by shrub and dwarf shrub tundra, degraded dwarf shrub tundra, and technogenic grassy and stony wastelands, as recorded by the 2015–2021 map, was revealed. The substitution series manifest themselves differently in various directions from the combine. Grassy and stony wastelands on sites of dead forests are common within a range from 3 km to the northeast to 10–15 km to the northwest and west and up to 25 km to the southeast of Norilsk. The development of vegetation observed during modern climate warming varies in different replacement zones of dead forests.

KEYWORDS: industrial impact, dynamics of vegetation**,** mapping, satellite images

ВВЕДЕНИЕ

Норильский горно-металлургический комбинат, основанный в 1935 г. на месте богатого месторождения цветных металлов – один из крупнейших в мире производителей никеля, платины и палладия, а город Норильск, где он расположен – один из наиболее загрязненных городов Арктики [*Bauduin* et al., 2014]. В 1930-х годах территория в его окрестностях была занята притундровыми лиственничными лесами. Но уже к 1970-м годам леса под воздействием выбросов в атмосферу сернистого ангидрида SO_2 начали усыхать, а развитие производства в 1980-е годы привело к масштабной деградации растительного покрова на окружающей территории. Для контроля за состоянием лесов неоднократно – в 1974, 1981, 1987 гг. – выполнялась аэрофотосъемка и проводились лесопатологические обследования [*Филипчук, Ковалев*, 1990]. В 1980-х – 1990-х годах выполнялась геоэкологическая оценка территории [*Мельников* и др., 1996; *Харук* и др., 1996; *Горшков,* 1997]. В 1997–1998 гг. группой сотрудников Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и Полярного института имени Скотта в Кембридже выполнены комплексные полевые исследования состояния растительности региона по космическим снимкам [*Капица* и др., 2001] и по снимку со спутника Landsat 1995 г. составлена карта состояния растительности [*Toutoubalina, Rees*, 1999].

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **valentinamsu@yandex.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* **olegzhelezn@gmail.com**

Развал СССР, переход комбината из государственной в частную собственность вызвали на рубеже веков перерыв в деятельности комбината, изменение объемов производства и снижение выбросов. Ответная реакция экосистем развивается на фоне потепления климата, создаются условия для частичного восстановления растительности. В связи с этим в 2001–2013 гг. красноярским Институтом леса имени В.Н. Сукачева и другими институтами Сибирского отделения РАН проведены многолетние полевые исследования на ключевых участках (включая геоботанические, геохимические, дендрохронологические), отраженные в специальном выпуске Сибирского экологического журнала [*Шишикин* и др., 2014].

Произошедшая в 2020 г. авария на комбинате с разливом дизельного топлива в р. Амбарную и загрязнением прилегающих к озеру Пясино территорий обусловила новый виток экологических исследований с оценкой состояния экосистем Норильского промышленного района в целом. В июле 2021 г. группа сотрудников географического факультета МГУ по заданию Полярного фонда выполнила обследование состояния растительности в зоне промышленного воздействия Норильского горно-металлургического комбината. Проведены аэровизуальные наблюдения, сделаны описания растительности на участках полевого обследования со взятием образцов растительности и последующим выполнением геохимических анализов. На этом этапе реализована возможность использования космических снимков со спутника Sentinel 2B. С целью обеспечения эталонов для их автоматизированной классификации проведено выборочное полевое дешифрирование снимков сверхвысокого разрешения. С применением новых более совершенных материалов космической съемки и новых технологических возможностей для Норильского промышленного района составлена высокодетальная карта растительности, в современном состоянии которой оказались отображены различные стадии замещения погибших лесов, а также признаки восстановления кустарниковой растительности в связи с потеплением. Задача настоящей статьи – на основе анализа составленной в 2021 г. детальной карты растительности, с учетом прежних материалов исследований и картографирования района, выявить закономерности и последовательность замещения погибших лесов другими растительными сообществами, а также особенности современного восстановления растительности, что необходимо знать для разработки рекомендаций по ограничению выбросов и рекультивации территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главным материалом для оценки динамики растительности Норильского промышленного района послужила составленная О.М. Железным карта современного состояния растительности этого региона. Она создана по материалам съемки со спутника Sentinel 2B, характеризующейся высоким пространственным (10 м) и спектральным (12 каналов) разрешением, что позволяет с большой детальностью картографировать растительность. Для первичной обработки снимков и классификации использована облачная платформа Google Earth Engine, позволяющая для оценки состояния растительности учитывать весь массив накопленных ранее данных дистанционного зондирования [*Gorelick* et al., 2017, *Тутубалина* и др., 2020, *Железный* и др., 2022]. По материалам съемки со спутника Sentinel 2B – значениям медианных за летний сезон (1.06–31.08) 2015-2021 гг. нормализованных вегетационных индексов NDVI, NBR, яркостей в каналах B4 (красном), B8 (ближнем инфракрасном) – создан медианный композит, на основе автоматизированной классификации которого с обучением по алгоритму Random Forest и создана карта состояния растительности этого региона. Ее сравнение с материалами полевых обследований прошлых лет, выполненных в основном той же группой сотрудников кафедр картографии и рационального природопользования географического факультета МГУ в 1997 г. [*Капица* и др., 2001], и картой состояния растительности, составленной О.В. Тутубалиной по снимку Landsat 18.07.1995 [*Toutoubalina, Rees*, 1999], позволяет выявить изменения растительности при долговременном промышленном воздействии, которое в последние десятилетия проходило в условиях потепления климата. Поскольку

основное промышленное загрязнение дымами комбината с значительным содержанием сернистого ангидрида проявляется в первую очередь в ухудшении состояния и гибели лесов, то для увеличения временного периода анализа привлечены топографические карты, отражающие распространение лесов в 1960 и 1977 гг., и материалы лесопатологических исследований 1970-х – 1980-х гг. [*Ковалев,* 1994; *Филипчук, Ковалев*, 1990].

В связи с очень высокой пространственной детальностью карты состояния растительности 2015–2021 гг., составленной по снимкам Sentinel 2B с разрешением в основных спектральных зонах до 10 м, для удобства анализа по району в целом пришлось выполнить преобразование этой карты с ее обобщением, что позволило сравнивать ее с менее детальными материалами прошлых лет. Этот подготовительный методический этап охарактеризован в следующем разделе.

Преобразование карты состояния растительности 2015–2021 гг.

Составленная по материалам 2015–2021 гг. карта (рис. 1, 2) отражает сложную мозаику мелких контуров с линейными размерами на местности до 30–50 м, их зрительное восприятие на карте возможно лишь в крупных масштабах порядка 1:10 000, используемых при локальных исследованиях. Обзорные исследования Норильского региона в целом требуют перехода к более мелким масштабам: 1:250 000–1:500 000. При представлении в этих масштабах составленная карта становится нечитаемой, требуется ее обобщение.

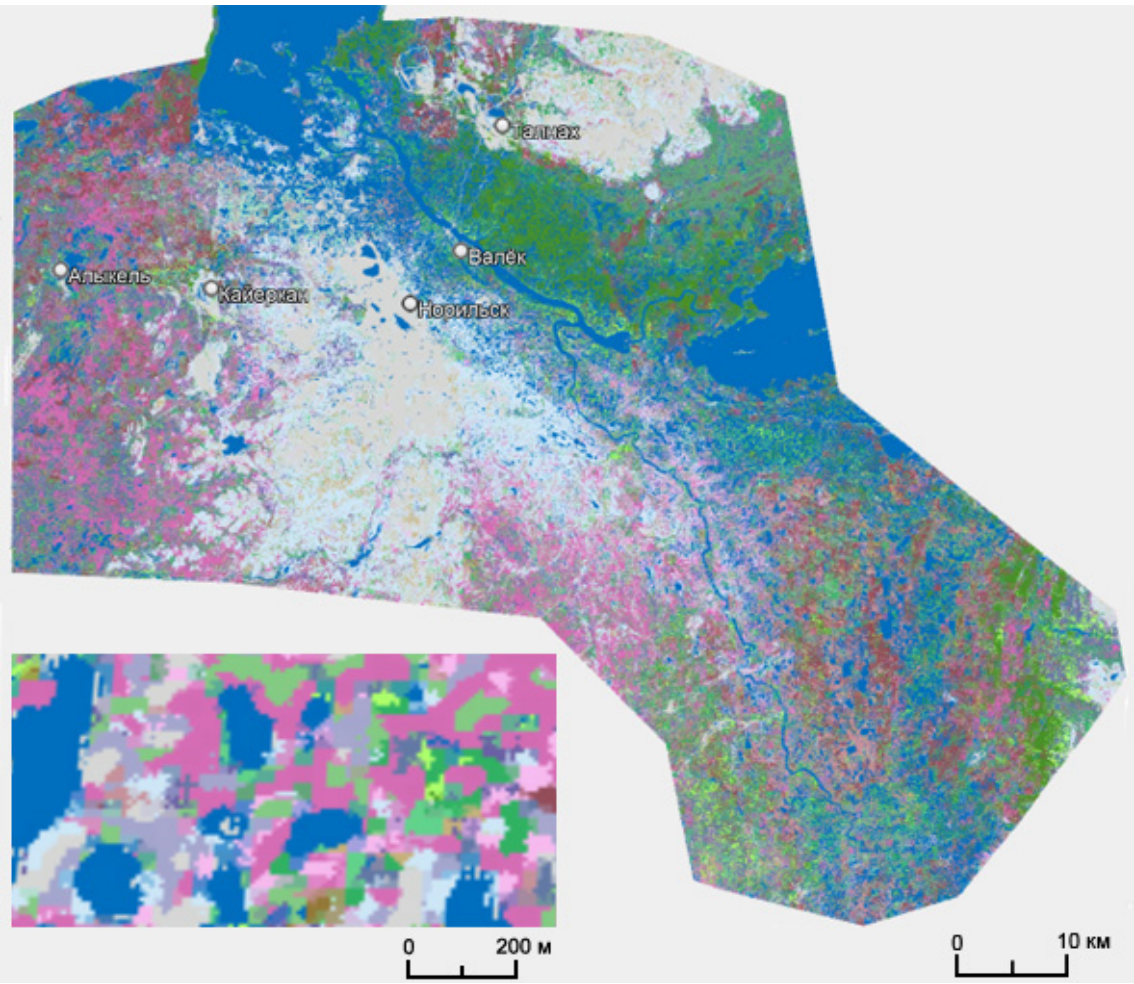

Рис. 1. Карта состояния растительности Норильского промышленного района, составленная по снимкам Sentinel2B 2015–2021 гг., представленная в обзорном масштабе 1:500 000, и ее фрагмент в масштабе 1:10 000
Fig. 1. Map of the state of vegetation for the Norilsk industrial region, compiled by Sentinel 2B 2015–2021 images, presented at a scale of 1:500,000, and its fragment at a scale of 1:10,000

	Тундра горная		Тундра равнинная и долинная			Лесотундра		Лес смешанный		Болото переходное	Заросли приручей-ные и вдоль ложбин
	Вершины	Склоны и ложбины	Типичная	Кустарничковая (в т.ч. полигональная)	Заболоченная	Кустарнико-вая	Редина				
Усл. фоно-вые участки	Пк Камени-стая пустошь	Пт,с Разнотравно-осоковая разреженная кустарничково-дриадовая со злаками (освяница) и лишайниками	Т Кустарничково-(голубика, брусника, багульник, ерник)-тальниковая разнотравно-осоковая	Тк Кустарничко-вая с морошкой и лишайниками	Тб Кустарничко-вая осоковая [мохово]-лишайнико-вая	ЛТ Ольховая кустарнич-ковая с очень редкими лиственни-цами	Р Лиственнич-ная берёзово-ольховая кус-тарничково-тальниковая разнотравная	Л Лиственнично-елово-берёзовый		Б Пушицево-осоковое моховое с тальником, твльнико-вая осоковая тундра	И Ивняковые тальниковые осоково-хвощовые зеленомош-ные
Средне наруш. участки	Пк Камени-стая пустошь		Т* Тальниковая разнотравно-осоковая или разнотравная	Тк* Деградировав-шая с редкими злаками	Тб* Тундра тальниковая осоково-хвощовая с отдельными кустарничками	ЛТ* Ольховая деград. злаково-осоково-хвощовая тальниковая с отд. кустарничками		Ин Злаковые, осоковые сообщества, в т.ч. на месте погибшего леса, гарях.	Ин Ивово-ольх.-бер. злаковые мелколесья, в т.ч. восст. на вырубках, гарях.		И* Тальниковые злаково-[пушицево]-хвощовые
Сильно наруш. участки	Пк* Каменистая пустошь		Пт* Разнотравно-злаковая разреженная пустошь	Пк* Пустошь с редкими злаками	Пт* Пустошь разреженная хвощово-злаковая с отд. тальником, встречается вариант с отд. кустами ольхи (в т.ч. отдельные участки на естеств. нарушениях – размывах, в высокогорье и т.д.)						
Прочее	О,Г Отвалы, асфальт, проч.	О Протечки трубопроводов	В Водные объекты								

Рис. 2. Легенда карты состояния растительности Норильского промышленного района с индексами для обозначения растительных сообществ на схеме мозаик контуров

Fig. 2. Legend for the map of the state of vegetation for the Norilsk industrial region with indices for designating plant communities on the contour mosaic scheme

1-й этап обобщения – составление схемы мозаик контуров

Контуры, выделенные на анализируемой карте, в большинстве случаев образуют сложные мозаики при сочетании из 5–6 растительных сообществ (см. фрагмент карты на рис. 1), в одних случаях без преобладания какого-либо из них, в других – с четким преобладанием определенных сообществ. Вид мозаики на некотором участке территории сохраняется, затем сменяется другим.

Однотипные мозаики при обобщении объединены в общие контуры, размеры которых в масштабе около 1:500 000 варьируют от 1 см^2 до нескольких см^2. При преобладании определенного растительного сообщества контур обозначается его индексом, при равновесном участии нескольких сообществ указываются 2 или 3 индекса преобладающих видов. Соответствие индексов классам растительности на исходной карте показано на рис. 2. Схема полученных контуров с индексами преобладающих растительных сообществ в мозаиках представлена на рис. 3.

2-й этап обобщения – определение районов с разным характером воздействия на растительность

Схема контуров однотипных мозаик дала основу для следующего уровня обобщения – выделения районов с различным проявлением промышленного воздействия комбината на растительность, которое отражается в появлении аналогов зональных типов растительности со средней или высокой степенью деградации или замещении одних зональных типов другими.

По сетке контуров мозаик выделено при их частичном объединении и небольшом переформировании 36 районов с разным характером промышленного воздействия на растительность; эти районы показаны на рис. 4. Контуры мозаик вне зоны существенного промышленного воздействия в эти районы не включены.

3-й этап обобщения – объединение районов с разным характером воздействия на растительность в экспозиционные профили

Дальнейший анализ структуры растительности в выделенных районах осуществлялся с учетом расстояния до источника воздействия по разным направлениям, в соответствии с розой преобладающих ветров. 36 районов объединены в группы в зависимости от ветровой экспозиции территории районов относительно источника воздействия. Такие группы образовали «экспозиционные профили», включающие районы на общем

направлении, но разном расстоянии от источника. На рис. 5 сформировано 9 «экспозиционных профилей» по 7 основным направлениям. Южное направление, по которому комбинат вплотную окружен горными массивами хребта Лонтокойский камень с каменистыми тундрами, не рассматривалось. В юго-восточном, основном секторе воздействия, где сказываются даже небольшие отклонения направления ветрового потока, подразделены профили ЮЮВ и ВЮВ направлений. В первой группе ЮЮВ направления, где воздействие зависит от положения анализируемой территории в рельефе, рассматриваются раздельно группа районов, охватывающих горные склоны вместе с подгорной равниной, и группа районов, расположенных на днищах речных долин.

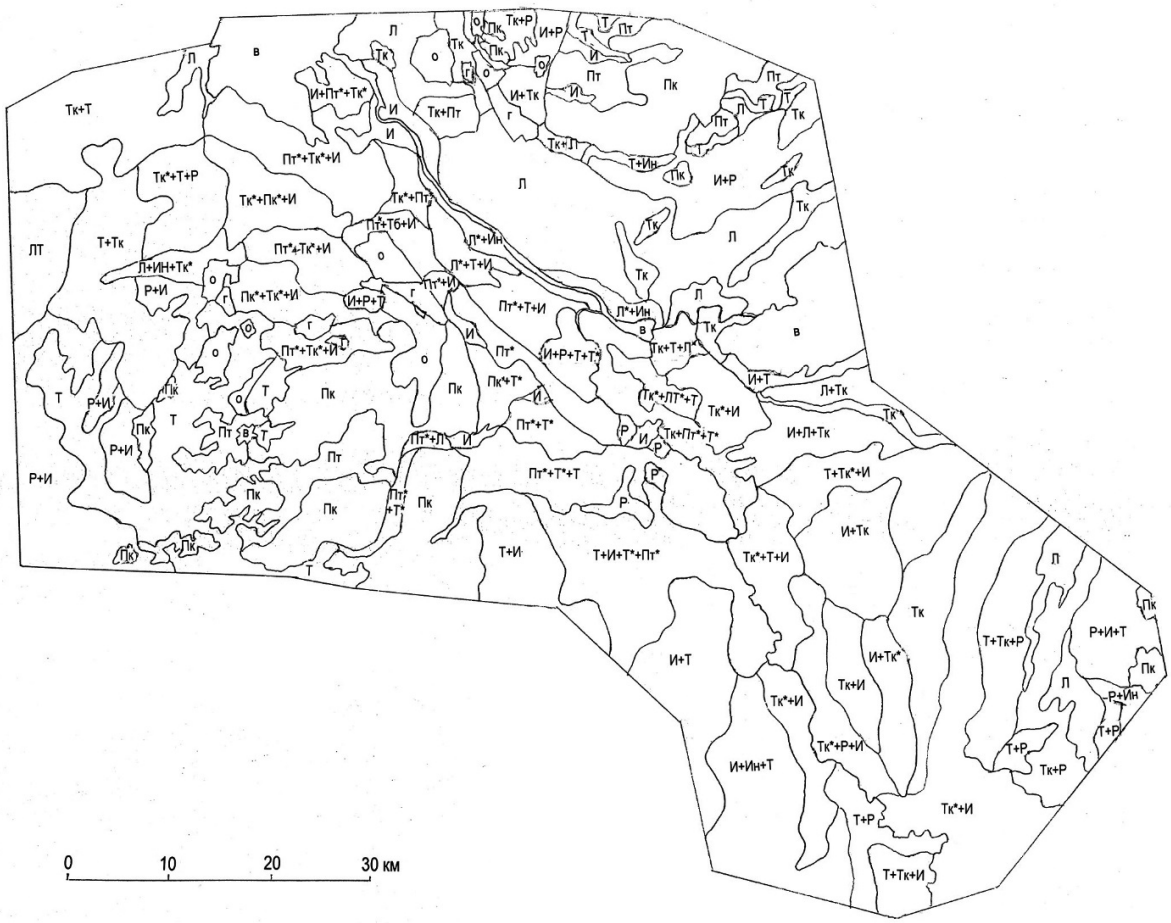

Рис .3. Схема мозаик контуров, выделенных по детальной карте состояния растительности Норильского промышленного района 2015–2021 гг. Преобладающие растительные сообщества в мозаике обозначены индексами
Fig. 3. Scheme of contours mosaics identified on a detailed map of the state of vegetation for the Norilsk industrial region in 2015–2020. The predominant plant communities in the mosaic are indicated by indices

Далее в пределах каждого района, входящего в «экспозиционный профиль», осуществлялся анализ состояния растительности в зависимости от географических особенностей территории (положения в рельефе, фонового типа растительности), расстояния от комбината. При анализе изменений состояния растительности на качественном уровне использовались разновременные материалы различного типа и детальности. Учтено распространение лесов по топографическим картам разных лет и лесотаксационным данным. Привлекались материалы наших полевых наблюдений в 1997 г. – геоботанические описания на эталонных участках, что представляло особую ценность. Выполнено сравнение результатов автоматизированной классификации растительности по снимкам Landsat 1995 г. и Sentinel 2015–2020 гг.

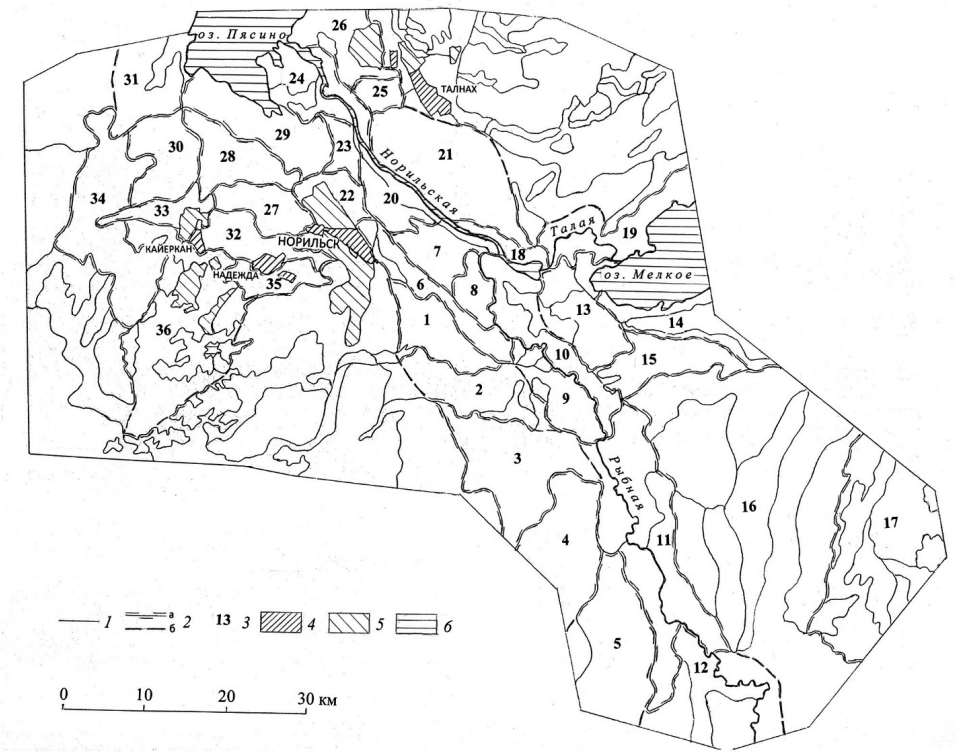

Рис. 4. Карта районов с различным проявлением промышленного воздействия на растительность, выделенных по схеме мозаик контуров растительных сообществ: 1- границы мозаик контуров; 2 – границы районов: а – совпадающие с границами мозаик контуров, б – не совпадающие с ними; 3 – номера районов, используемые в дальнейшем анализе; 4 – застроенные территории; 5 – промзоны, карьеры, отвалы, отстойники; 6 – водные объекты

Fig. 4. Map of districts with different reflection of industrial impact on vegetation, identified according to the scheme of contours mosaics of plant communities: 1– boundaries of contours mosaics; 2 – boundaries of districts: a – coinciding with the boundaries of contours mosaics, b – not coinciding with them; 3 – district numbers used in further analysis; 4 – built-up areas; 5 – industrial zones, quarries, dumps, settling tanks; 6 – water bodies

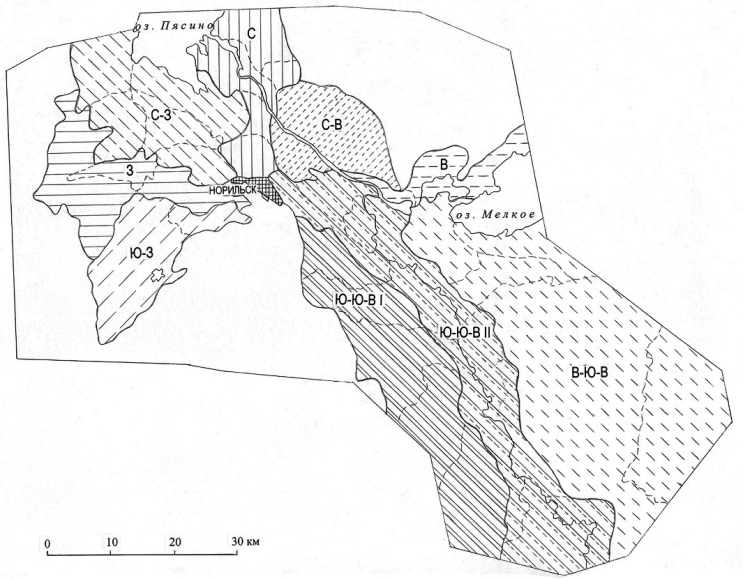

Рис. 5. Объединение 36 районов с различным проявлением промышленного воздействия на растительность в 9 экспозиционных профилей

Fig. 5. Consolidation of 36 areas with different reflection of industrial impact on vegetation into 9 exposure profiles

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования выполнен анализ состояния и трансформации растительности Норильского промышленного региона по экспозиционным профилям. Юго-восточный сектор наиболее подвержен воздействию дымов комбината в связи с преобладанием ветров ЮВ направления, составляющих до 40 % [*Онучин* и др., 2014]. По характеру рельефа и общим ландшафтным условиям, в этом секторе различаются: а) подгорные равнины и пологие северо-восточные склоны хребта Лонтокойский камень; б) долина реки Норильской и ее притока реки Рыбной; в) правобережье р. Рыбной – межгорный прогиб между хребтом Лонтокойский камень и отрогами плато Путорана. Эти три группы несколько различаются по положению относительно преобладающих ветров – направление первых двух совпадает с направлением воздушных потоков, огибающих поднятие Лонтокойского камня и может быть отнесено к ЮЮВ, а направление третьей группы участков до отрогов Путорана – к ВЮВ.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ ЮЮВ-I

Подгорные равнины восточнее крутых склонов Норильских гор и расположенные южнее более пологие склоны хребта Лонтокойский камень первыми принимают на себя загрязнение норильских дымов и подвержены сильному воздействию с самого начала работы комбината. Выделенные на рис. 4 районы 1, 2, 3, 4, 5 составляют единый ряд в направлении ЮЮВ на расстоянии от 3 до 70 км от источника загрязнения, образуя первый экспозиционный профиль ЮЮВ-I, показанный на рис. 5. Рассмотрим последовательно состояние растительности в этих районах в прошлом и ее преобразование до современного состояния.

Район 1 представляет собой участок подгорной равнины у восточного подножия Норильских гор. Он начинается непосредственно от Норильска, далее к югу расширяется до 10 км. До освоения территории этот участок был занят лиственничным лесом, но, находясь в непосредственной близости к Норильску, в первую очередь подвергался антропогенному воздействию, и к 1960 г., судя по топографической карте м. 1:100 000, уже представлял собой гарь. При классификации по снимку Landsat 1995 г. он отнесен к каменистым участкам без растительности. При полевом обследовании в 1997 г. (эталонные участки 71, 80, 81) следов пожаров здесь не обнаружено, но на подгорной равнине и в нижней части горного склона описаны фрагменты совершенно мертвого лиственничного леса с сухими, лишенными коры, упавшими и еще стоящими стволами высотой 12–15 м, а у подножия склона высотой даже до 20 м, с сомкнутостью 0,5, со следами мертвого кустарникового яруса, мертвыми остатками кустарничков и мхов. Современное состояние по снимкам Sentinel 2B классифицировано как антропогенная пустошь, в северной части района преимущественно каменистая. В южной части района, где в 1960 г. лес еще существовал, но уже не показан на карте 1977 г., по снимкам 2015–2021 гг. выделена пустошь травянистая, с разреженным хвощево-злаковым покровом (90 %), сочетающаяся с небольшими участками нарушенной типичной кустарничковой тундры (10 %). Вдоль русел выходящих с гор водотоков развиваются приручейковые ивняковые и тальниковые осоково-хвощевые заросли. Таким образом, на месте существовавших до освоения этой территории лесов, после их гибели при пожарах и из-за загрязнения дымами комбината, образовались техногенные каменистые и травянистые пустоши с остатками деградированной типичной кустарничковой тундры, что указывает на последовательность негативной трансформации растительности: лес – деградированная кустарничковая тундра – травянистая пустошь – каменистая пустошь. Современное возобновление зеленой растительности – кустарниковой и травянистой – четко приурочено к водотокам. Такая картина наблюдается на удалении до 10–15 км к ЮЮВ от Норильска.

Район 2 охватывает пологие нижние участки склона хребта Лонтокойский камень, обращенные на север, находящиеся на расстоянии 15–25 км к ЮЮВ от Норильска. Судя по топографическим картам в 1960 г., они еще были покрыты лесом, но на карте 1977 г. лес уже не показан, а по лесопатологическим материалам отмечена гибель лесов к 1975 г.

По снимку Landsat 1995 г. участок классифицирован как сильно поврежденные и погибшие лиственничные леса. Современное состояние по снимкам Sentinel 2B 2015–2021 гг. определено как сочетание пустоши травянистой разнотравно-злаковой, составляющей 70 %, с участками типичной тундры кустарничково-тальниковой разнотравно-осоковой, фоновой (10 %) и деградированной (10 %). Вдоль ложбин развиваются ивняково-тальниковые заросли (10 %). Как и в районе 1, прослеживается негативная трансформация растительности от леса до пустоши, но с несколько более растянутым рядом переходов: лес – типичная кустарничковая тундра – деградированная кустарничковая тундра – травянистая пустошь. Таким образом, структура мозаики растительных сообществ в районе 2 указывает на то, что после гибели лес был замещен кустарничковой тундрой, которая затем деградировала и на ее месте образовалась травянистая пустошь.

Район 3 охватывает пологие нижние участки северо-восточного склона хребта Лонтокойский камень, удаленные от Норильска на 25–35 км. Леса, существовавшие в 1960 г. и погибшие к 1975 г., показаны на карте 1977 г. только в южной части района, а по снимку Landsat 1995 г. классифицированы как сильно поврежденные и погибшие лиственничные леса. В современном состоянии по результатам классификации по снимкам Sentinel 2B 2015–2021 гг. преобладает типичная кустарничковая тундра (60 %) с небольшой долей ее нарушенных участков (10 %) и травянистых пустошей (10 %), и с заметным участием ивняковых зарослей по ложбинам (20 %). Здесь на месте исчезнувших лесов произошло их повсеместное замещение тундровыми сообществами, на что обращали внимание и сибирские ученые, исследовавшие Норильский промышленный регион в 2005–2012 гг., которые отмечали, что гибель древостоев сопровождается трансформацией нижних ярусов, замещением лесных ассоциаций на тундровые и лугово-болотные комплексы [*Пименов* и др., 2014]. Мозаика контуров 2015–2021 гг. показывает, что при продолжающемся воздействии загрязнения кустарничковая тундра деградирует, затем превращаясь в травянистую пустошь. В то же время, увеличение сезона вегетации при потеплении климата [*Shabanov* et al., 2021, *Tutubalina, Rees*, 2022] и дополнительное увлажнение при оттаивании мерзлого грунта стимулируют развитие ивняковых зарослей в понижениях рельефа.

Район 4 включает предгорную равнину и нижнюю часть выположенного восточного склона хребта Лонтокойский камень, удаленные от Норильска на 35–50 км. На карте 1977 г. территория показана как залесенная, но лесопатологические исследования указывают на гибель лесов к 1975 г. По снимку Landsat 1995 г. на этом участке классифицированы погибшие лиственничные леса. При полевых исследованиях в 1997 г. (эталонный участок 39 на сопке Вершина Таганара среди предгорной равнины) здесь описан мертвый лиственничник ивняково-кустарничково-злаковый высотой 10–12 м с пятнами оголенных почв и мертвой растительности – мхов, лишайников, травяно-кустарничкового яруса, кустарников. В современном состоянии по результатам классификации по снимкам Sentinel 2B 2015–2021 гг. повышенные местообитания заняты типичной кустарничковой тундрой с небольшими включениями участков кустарниковой тундры (45 %), а доля травянистых пустошей, приуроченных здесь к участкам мерзлотного рельефа, наледям, снижается (5 %). При этом, 50 % составляют ивняковые заросли и мелколесья, четко приуроченные к понижениям рельефа, многочисленным ложбинам этого достаточно расчлененного участка. Таким образом, на более удаленных, и, соответственно, менее подверженных загрязнению участках погибших лесов произошло их замещение, в основном, типичной кустарничковой тундрой, но увеличение продолжительности сезона вегетации при потеплении климата [*Shabanov* et al., 2021, *Tutubalina, Rees*, 2022], а также дополнительное увлажнение при оттаивании мерзлого грунта вызвало здесь активное развитие по ложбинам ивняково-тальниковых зарослей, обеспечивших общее позеленение территории.

Район 5 включает участок предгорной равнины восточнее хребта Лонтокойский камень на удалении от Норильска на 50–70 км, показанный на карте 1977 г. как залесенный, для которого по лесопатологическим исследованиям указывается несколько более

поздняя, по сравнению с предыдущими, гибель лесов к 1979 г. По лесопатологическим обследованиям 1988 г. он отнесен к погибшим лесам. По аэровизуальным наблюдениям в 1997 г. здесь также отмечены усохшие леса, а по снимку Landsat 1995 г. классифицированы умеренно поврежденные лиственничные леса в сочетании с участками погибших. Дендрохронологические исследования сибирских ученых в начале XXI века на эталонных участках на расстоянии до 85 км от Норильска показали, что всплеск гибели лиственницы произошел в 1975–1980 гг., и к 2004 г. лишь 23 % деревьев здесь оставались живыми. Но у оставшихся в живых в конце 1990-х – начале 2000-х гг. отмечалось некоторое увеличение прироста годичных колец роста [*Кирдянов* и др., 2014]. По результатам классификации по снимкам Sentinel 2B 2015–2021 гг. большую часть площади рассматриваемого района 5 (60–70 %) занимают ивняково-тальниковые заросли, чередующиеся с участками ивово-ольхово-березового мелколесья и редин, а также сохранившегося смешанного леса, распространяющиеся на различные, а не только пониженные местообитания. На повышенных местообитаниях на месте ранее погибших лесов преобладает заместившая их тундра типичная кустарничковая с участками кустарниковой тундры (30 %). Таким образом на удалении 50–70 км, при ослаблении загрязнения в связи с значительной дальностью от источника, в условиях потепления климата, происходит постепенное возобновление древесно-кустарниковой растительности на месте погибших лесов.

Смена типов мозаик контуров растительности на разном расстоянии от комбината хорошо иллюстрируется увеличенными фрагментами карты состояния растительности, составленной по снимкам Sentinel 2B 2015–2021 гг., выделенными для 5 рассмотренных районов и представленными на рис. 6.

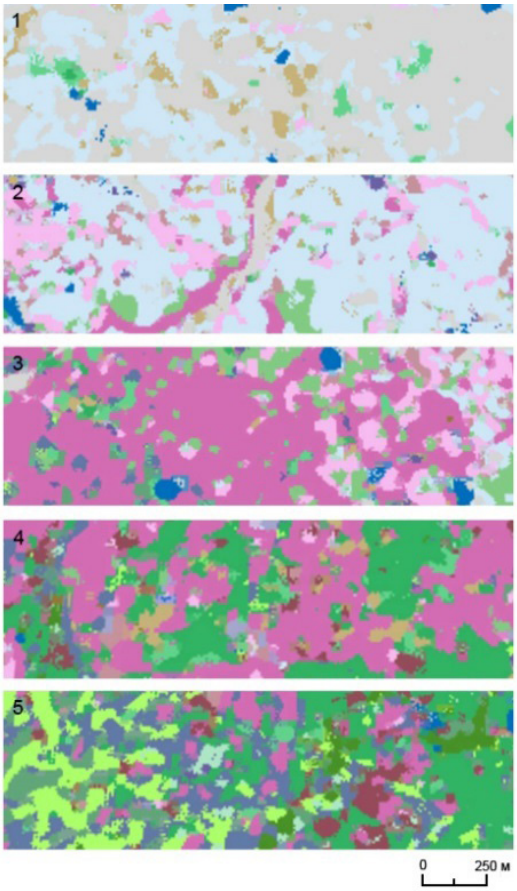

Рис. 6. Фрагменты карты состояния растительности, составленной по снимкам Sentinel 2B 2015–2021гг., иллюстрирующие смену видов мозаики контуров для районов 1–5

Fig. 6. Fragments of the state of vegetation map compiled by Sentinel 2B 2015–2021 images, illustrating the change in the types of contours mosaic for districts 1–5

Заключение по экспозиционному профилю ЮЮВ-I

Соотношение площадей разных растительных сообществ по 5 районам экспозиционного профиля ЮЮВ-I позволяет выявить некоторые закономерности трансформации растительности на разном удалении от источника воздействия. Укажем на основные из них. В непосредственной близости к комбинату, на удалении от него до 15 км, гибель лесов отмечалась уже в 1960-е годы, в данном случае от пожаров, но, видимо, сильное воздействие дымов комбината препятствовало послепожарному восстановлению. В 1970-е годы и не затронутые пожарами леса в условиях аэротехногенного загрязнения погибли, территория превратилась в травянистую пустошь и на удалении до 15–25 км остается в значительной мере таковой до настоящего времени. Исключение составляют места выхода с гор водотоков, где на участках избыточного увлажнения развиваются приручейковые ивняковые заросли.

При дальнейшем удалении от комбината далее 25 км и более поздних сроках гибели лесов на их месте образуются и сохраняются до сих пор участки деградированной кустарничковой тундры, а затем, на удалении до 35–40 км, преобладают участки фоновой типичной кустарничковой тундры, свидетельствуя о замещении лесных ландшафтов тундровыми. При этом полевые данные, аэровизуальные наблюдения и выборочные снимки высокого разрешения показывают, что сухостой стволов лиственницы среди тундровой растительности сохраняется и до настоящего времени. В то же время на увлажненных местообитаниях в понижениях рельефа в 2015–2021 гг. отмечается развитие ивняковых зарослей, которых при полевых исследованиях в 1997 г. не наблюдалось; их появление связывается с климатическими изменениями в период потепления. И, наконец, на удалении более 40 км, при ослаблении дымового загрязнения, ивняковое возобновление становится все более значимым, способствуя восстановлению древесно-кустарниковой растительности; это подтверждается просмотром снимков высокого разрешения, на которых среди кустарников становятся видны и кроны лиственниц. При дальнейшем удалении от источника загрязнения на 50–70 км возобновление кустарников выходит за пределы пониженных местообитаний, мелколесья и редины появляются на плакорных участках, распространяясь на большую часть территории и способствуя восстановлению лесных ландшафтов.

Выявленные особенности трансформации растительности получены в результате анализа по районам наиболее важного в Норильском промышленном регионе экспозиционного профиля. Столь же детальный анализ выполнен по всем 36 районам. Поскольку в рамках журнальной статьи невозможно привести полностью его материалы, ограничимся далее представлением основных результатов этого анализа по экспозиционным профилям в целом.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ ЮЮВ-II

Второй экспозиционный профиль того же направления охватывает группу районов в долине р. Норильской и ее притока р. Рыбной. В отличие от предыдущего профиля, где поднимающиеся склоны хребта Лонтокойский камень обусловливают обтекание его воздушным потоком, здесь поток следует по понижению долины, вначале р. Норильской, по террасам ее левого берега, а затем по прогибу долины р. Рыбной. Особенность обеих долин составляет широкое развитие мерзлотного термокарстового рельефа и густой сети термокарстовых озер.

Профиль ЮЮВ-II (районы 6–12), как и предыдущий, отражает преобразование ландшафтов в результате гибели лесов под воздействием дымов Норильского горно-металлургического комбината на разном расстоянии от источника воздействия – наиболее сильное, до образования травянистой пустоши на удалении до 20 км; замещение лесов деградированной, а затем и типичной кустарничковой тундрой на удалении до 40 км, и деградированной кустарниковой тундрой на удалении порядка 60 км. Такое последовательное замещение проявляется не совсем одинаково на двух профилях ЮЮВ направления. Оно наиболее четко выражено на хорошо дренированных склонах хребта Лонто-

койский камень, и менее четко проявляется вдоль речных долин Норильской и Рыбной с характерным для них обилием термокарстовых озер, избыточным увлажнением и заболоченностью.

Для обоих профилей в период потепления характерно появление и развитие кустарниковой растительности, также не одинаковое при разном удалении от комбината. В ближней к нему зоне техногенной пустоши – появление приручейковых ивняково-тальниковых зарослей по водотокам; в зоне замещения погибших лесов кустарничковой тундрой – развитие ивняков по ложбинам, понижениям рельефа; в зоне преобладания кустарниковой тундры – появление участков ивово-ольхово-березовых мелколесий и редин, которые выходят на плакорные местообитания, способствуя возобновлению лесов.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ ВЮВ

Из районов юго-восточного сектора, лежащих в обширном понижении с крупными озерами перед склонами плато Путорана (районы 13–17), сформирован еще один экспозиционный ряд в направлении ВЮВ, немного отличающемся от направления основного ветрового потока. Этот профиль показывает, как даже такое небольшое отклонение от преобладающего направления ветров сказывается на состоянии растительности. В районах ВЮВ направления воздействие комбината, проявляющееся в замещении погибших лесов кустарничковой и, главным образом, кустарниковой тундрой, сказывается лишь на расстоянии до 30 км, далее структура ландшафтов мало зависит от распространения загрязнения и определяется, в основном, естественными условиями увлажнения и мерзлотного рельефа, а на удалении 70 км и более распространены неповрежденные леса. Потепление климата здесь также способствует общему позеленению, охватывающему в первую очередь пониженные и увлажненные местообитания, но распространяющемуся и на плакорные условия.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЕ ПРОФИЛИ В, СВ НАПРАВЛЕНИЙ

Ветры этих направлений занимают в розе ветров Норильска малую долю (В – 7 %, СВ – 3,2 %) и в этом направлении загрязнение далеко не распространяется. Районы, расположенные вблизи комбината к востоку от него – в долине р. Норильской – были рассмотрены при анализе юго-восточного сектора. Северную часть района 6 и район 7 можно рассматривать как начало экспозиционного профиля и восточного направления, включающего еще 2 района (18, 19).

В целом короткий экспозиционный профиль В свидетельствует о быстром снижении степени воздействия комбината на растительность к востоку от него; гибель лесов с образованием техногенных пустошей и кустарниковых тундр ограничивается зоной до 10–15 км. На расстоянии 20–25 км леса испытывают лишь слабое повреждение. Характерное для региона в целом улучшение состояния лесов и общее увеличение озелененности территории в период потепления наиболее четко проявляется в восточном направлении от комбината, куда дымовое загрязнение распространяется слабее.

Начальный участок экспозиционного профиля СВ приходится на тыловую террасу левого берега р. Норильской – северную часть района 6, представляющего собой техногенную пустошь; ширина его в этом направлении 1–2 км. Далее профиль пересекает долину р. Норильской до поднятия гор Хараелах, включая 2 района (20, 21) на террасах обоих берегов.

В целом экспозиционный профиль СВ направления, как и профиль В направления, показывает, что загрязнение по этим направлениям далеко не распространяется, на расстоянии порядка 20 км отмечается лишь слабое воздействие на леса. Но в ближней к комбинату зоне – до 10 км – в сконцентрированном виде прослеживаются те же последствия воздействия на растительность, что и по другим направлениям – ее полная гибель с образованием техногенных пустошей вблизи комбината, потом замещение погибших лесов вначале деградированной, а затем типичной кустарничковой тундрой, и далее кустарниковой тундрой, что хорошо видно на примере района 20 (рис. 7). Но на расстоянии более 10 км по этим направлениям сохраняются слабо поврежденные леса.

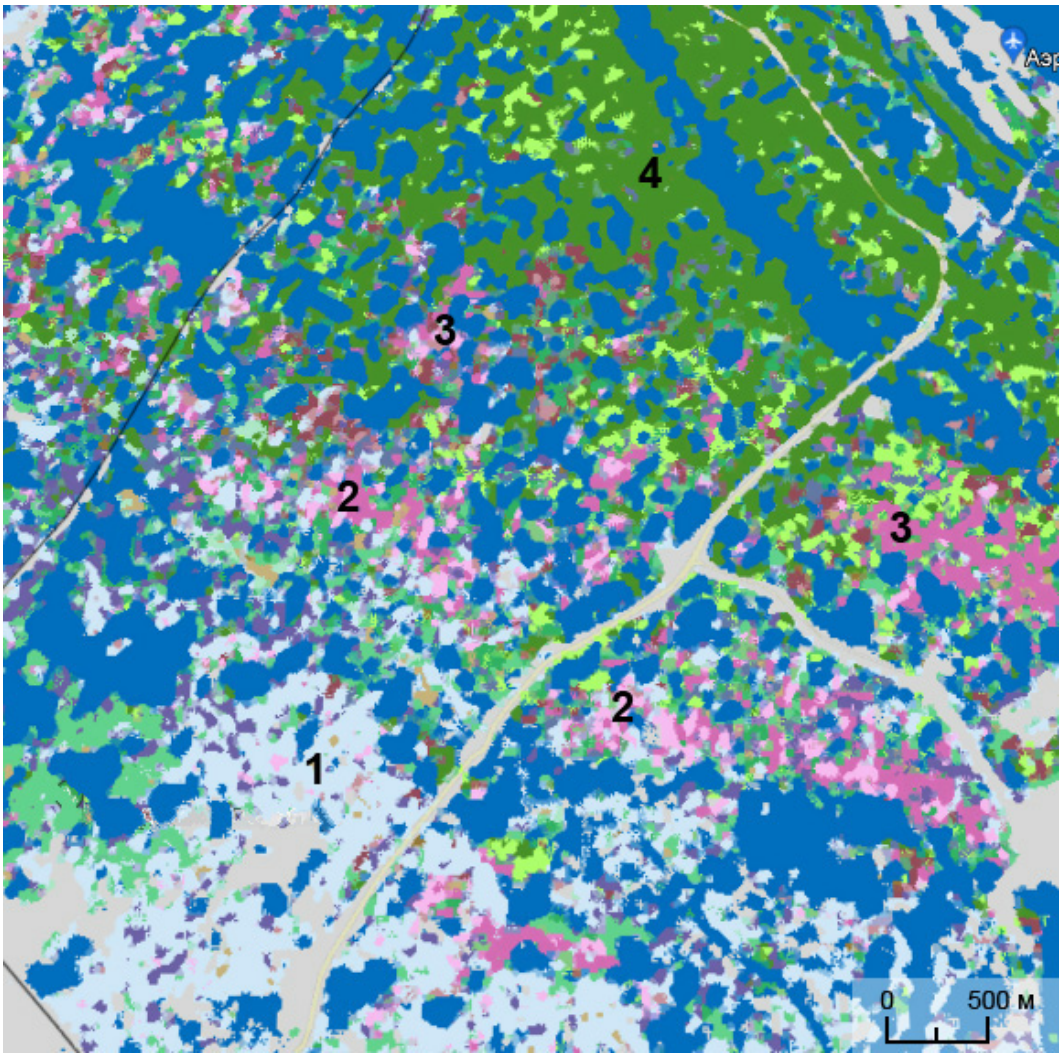

Рис. 7. Смена вторичных растительных сообществ, замещающих погибшие леса на разном удалении от Норильска в СВ направлении, на примере участка района 20: 1 – преобладание аэротехногенных травянистых пустошей; 2 – преобладание деградированной и фоновой типичной кустарничковой тундры; 3 – преобладание типичной кустарничковой тундры в сочетании с кустарниковой тундрой и сохранившимися участками поврежденного леса; 4 – сохранившиеся поврежденные лиственничные леса в сочетании с участками березово-ольхового возобновления на вырубках и гарях

Fig. 7. Change of secondary plant communities replacing dead forests at different distances from Norilsk on the NE direction, at the example of area 20: 1 – dominance of aerotechnogenic grassy wastelands; 2 – the predominance of degraded and typical dwarf shrub tundra; 3– the predominance of typical dwarf shrub tundra in combination with shrub tundra and preserved areas of damaged forest; 4 – preserved damaged larch forests in combination with areas of birch-alder regeneration in clearings and burnt areas

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ С

В северном направлении долина р. Норильской, в которую выходят впадающие в озеро Пясино реки Вологочан, Амбарная и Щучья, расширяется до 20 км, переходя в озерную террасу. Такое расширение обеспечивает свободное распространение воздушных потоков северного и северо-западного направлений. Профиль С включает районы нижней части долины р. Норильской, ее устьевой участок на озерной террасе оз. Пясино (районы 22–24) и приозерные понижения западнее поднятия Хараелахских гор (районы 25, 26).

Экспозиционный профиль северного направления, как и северо-восточного, показывает сильное воздействие комбината лишь на ближних расстояниях – с образованием техногенной пустоши на месте исчезнувших лесов на удалении до 5 км и замещением погибших лесов деградированной кустарничковой тундрой на расстоянии до 10 км. При этом в приречной части, на расстоянии 15 км от комбината, участки лесов еще сохраняются. На большем удалении – в приустьевой зоне р. Норильской, на ее правом берегу – ландшафты сохраняются в неповрежденном виде или с очень слабыми признаками аэротехногенного повреждения дымами Норильска, но при увеличении воздействия со стороны производств в городе-спутнике Талнахе с его отстойниками. Увеличение позеленения при потеплении климата проявляется на этом профиле главным образом в приустьевой зоне р. Норильской, где широко развиваются приречные ивняки.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ СЗ

Воздушные потоки северо-западного направления имеют возможность распространяться широким веером по расширяющейся в низовьях долине р. Норильской и в определенной мере ограничиваются уступами бортов этой долины, поднимающимися от 70-метрового уровня террас до уровня высот окружающих равнин 200–250 м. Степень и характер воздействия на растительность здесь определяется не столько расстоянием от источника загрязнения, сколько характером поверхности террас разного уровня. Поэтому и контуры экспозиционного профиля не выстраиваются в ряд в зависимости от этого расстояния, а располагаются скорее веером от тыловых террас речной долины к озерной террасе озера Пясино (районы 27–29) и выходят далее за пределы речных и озерных террас (районы 30, 31).

В целом анализ районов северо-западного экспозиционного профиля показывает, что в этом направлении, как и в юго-восточном, сильное воздействие комбината приводит к уничтожению лесов, образованию на их месте техногенных пустошей, распространяющихся до 20 км от комбината, и формированию деградированных кустарничковых тундр на расстоянии до 35 км. Там, где крупных лесных массивов не существовало, типичные кустарничковые и кустарниковые тундры и лесотундры частично претерпели деградацию, небольшие участки лесов усохли. Но при потеплении климата по понижениям рельефа развиваются ивняковые заросли, на плакорах появляются ивово-ольхово-березовые мелколесья и редколесья, обеспечивая возврат к лесотундровым ландшафтам, а участки существовавших на западном берегу озера Пясино лесов даже расширились.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ З

Ветры западного направления занимают в розе ветров района относительно небольшую долю – 11 %, – не способствуя дальнему распространению дымов Норильска, но в этом направлении расположены дополнительные источники загрязнения – медные заводы Надежды и угольные копи Кайеркана, по нему идут основные транспортные артерии – автомобильная и железная дороги Дудинка – Норильск, железнодорожная ветка Кайеркан – промзона Норильска. Короткий западный экспозиционный профиль включает, по существу, два узких района западного направления на разном расстоянии от Норильска (32, 33) и третий, более широко охватывающий западную периферию Норильского промышленного региона вдали от источника воздействия (34).

Экспозиционный профиль западного направления показывает, что заметное дымовое воздействие комбината, приводящее к гибели лесов, деградации тундр и образованию техногенных пустошей, распространяется к западу на 10–15 км. На расстоянии до 20–25 км сильнее действуют другие факторы промышленного и транспортного использования территории, а на удалении более 30 км сохраняются типичные для района тундровые и лесотундровые ландшафты, испытывающие при потеплении увеличение древесно-кустарниковой составляющей.

ЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ ЮЗ

Профиль охватывает расчлененную предгорную равнину севернее поднимающихся массивов Лонтокойского камня (район 35) и его обширные увалисто-волнистые западные предгорья с многочисленными выходами коренных пород, образующими сопки высотой 400–500 м (район 36). На волнистых равнинах этого района преобладают типичные кустарничковые тундры с участками лиственничных редин, на фоне которых четко выделяются контуры сопок с каменистыми и травянистыми пустошами. Часть территории занята обширными отвалами угольного производства шахт Кайеркана, а к юго-западу от Надежды сооружен отстойник-хвостохранилище отходов медного производства и проходит пульпопровод к нему. В районе 35, где действуют предприятия Надежды, в близости к Норильску до 10 км, естественные тундры деградировали, превратившись в техногенные пустоши. В районе 36, при удалении от Норильска 15–30 км и относительно небольшой доле ветров юго-западного направления (10,5 %), дымовое загрязнение комбината незначительно, но велика роль других факторов промышленного воздействия, например, аварий и протечек на пульпопроводе.

Периферийные районы западного и юго-западного направлений, где преобладает типичная кустарничковая тундра с крупными пятнами лиственничных редин, переходящая в лесотундру, мало подвержены аэротехногенному загрязнению. В исследованиях сибирских ученых в начале 2000-х годов также отмечалось, что растительность на трансектах западного и юго-западного направлений на расстоянии 25–50 км испытывает умеренные нарушения с сохранением зональных черт [*Пименов* и др., 2014]. В этих районах хорошо выражено общее позеленение территории при потеплении климата, а по снимкам сверхвысокого разрешения отмечаются также молодые лиственничные редины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ЭКСПОЗИЦИОННЫМ ПРОФИЛЯМ

Итоги выполненного по экспозиционным профилям анализа относятся к разным аспектам исследования:

– выявление закономерностей трансформации притундровых лиственничных лесов при аэротехногенном воздействии, рядов замещения одних растительных сообществ другими;

– определение пространственных закономерностей распределения рядов трансформации в зависимости от расстояния до источника загрязнения и ветрового режима;

– определение особенностей изменений растительности, вызванных потеплением климата, в зонах ее различной аэротехногенной трансформации.

Аэротехногенная трансформация растительности

Детальный анализ современного пространственного распределения различных типов растительности, заместивших леса, погибшие от дымового загрязнения комбината, позволил выявить последовательность смен вторичных растительных сообществ при трансформации ландшафтов от лиственничных лесов до техногенных пустошей.

При усыхании и гибели древесного яруса этих лесов (Л) – деревьев лиственницы – кустарниковый ярус (обычно это береза, ольха, ива) вначале остается живым, сохраняется кустарниковая тундра (Тк). При наших полевых исследованиях в 1997 г. отмечалась гибель и кустарникового яруса с его замещением сообществами типичной кустарничковой тундры, а там, где кустарникового яруса в лиственничном лесу не было, – замещение погибшего лиственничного леса сразу кустарничковой тундрой (Т). И хотя кустарничковые тундры приспосабливаются к более жестким условиям существования, по сравнению с кустарниковыми, но на определенном этапе и они не выдерживают загрязнения, кустарнички погибают. Остаются наиболее жизнестойкие представители травяного яруса – осоки, хвощи, и происходит замещение тундровых сообществ травянистой пустошью (Пт), которая, при полной гибели любой растительности, превращается в каменистую пустошь (Пк).

На замещение лесов тундрами как типичную картину на расстоянии 30–100 км к юго-востоку от комбината обращали внимание и сибирские ученые при обследовании

района в первом десятилетии XXI века. Они отмечали, что на местах исчезновения лесов в зонах сильного техногенного воздействия характерно появление травяно-моховой растительности, а в зонах среднего воздействия разрастание кустарниковой [*Shevyrnogov* et al., 2008]. По полевым наблюдениям усыхание и гибель древостоев, отмирание кустарников сопровождается трансформацией нижнего яруса, замещением лесных ассоциаций на тундровые и лугово-болотные комплексы [*Пименов* и др., 2014].

Названный выше логически ясный ряд трансформаций: Л – Тк – Т – Пт – Пк, в котором каждое последовательное замещение одних видов растительных сообществ другими зависит от силы и времени воздействия, оказался пространственно зарегистрированным картой состояния растительности, составленной по снимкам Sentinel 2B 2015–2021 гг. Автоматизированная классификация с выделением различных видов растительных сообществ выполненная по снимкам с разрешением 10 м, позволила выделить на карте даже небольшие участки местности в десятки-сотни метров, занятые этими сообществами, что позволяет проследить постепенные переходы между ними.

Выявленный ряд трансформации растительности от лесов до техногенных пустошей наиболее ярко проявился в юго-восточном секторе, где роза ветров, с преобладанием ЮВ направления, и условия рельефа, с обширным прогибом в том же направлении между хребтом Лонтокойский камень и отрогами плато Путорана, создали условия для распространения загрязнения на дальние расстояния и постепенного ослабления силы воздействия, в результате чего здесь последовательно проявились различные стадии трансформации растительности. На рис. 6 была продемонстрирована смена типов мозаики контуров в районах экспозиционного профиля ЮЮВ-1 на разном расстоянии от источника воздействия. Приведенные на этом рисунке фрагменты карты в наглядном виде представляют названный выше ряд трансформаций растительности, зафиксированный на 2015–2021 гг. Те же закономерности замещений, хотя и значительно менее четко, прослеживаются и по другим направлениям.

В близких по характеру исследованиях ученых Сибирского отделения РАН в начале 2000-х годов было выполнено экспертное зонирование территории по состоянию растительного покрова, при котором выделены техногенные пустоши на расстоянии 15 км от комбината и техногенные биоценозы в зоне 20–90 км от комбината [*Корец* и др., 2014], но без их дифференциации в пределах этой широкой зоны; такое разделение удалось выполнить в наших исследованиях с помощью карты, составленной по снимку Sentinel 2B высокого разрешения. На расстояниях более 110 и 140 км в указанной работе сибирских ученых выделены умеренно и слабо нарушенные природные экосистемы. Протяженность районов со слабой нарушенностью на значительных расстояниях в юго-восточном направлении в настоящем исследовании проследить не удалось в связи с ограничением района картографирования.

Пространственная картина влияния ветрового режима на распределение загрязнения и трансформацию растительности

Анализ состояния растительности в зависимости от направления распространения загрязнения, определяемого ветровым режимом, и с учетом дальности от источника воздействия, проведенный по экспозиционным профилям, помогает выявить полную пространственную картину распределения аэротехногенных загрязнений. Она оказалась зафиксированной мозаиками контуров, в которых проявились закономерности трансформации растительности.

В розе ветров Норильска преобладают ветры ЮВ направления, составляющие до 40 %. В этом же направлении идет и основной прогиб в рельефе между поднятием хребта Лонтокойский камень и отрогами плато Путорана, обеспечивая свободный коридор ЮВ направления, по которому проходит и долина р. Рыбной. Далее этот прогиб тянется на юг на сотни километров, и по материалам лесопатологических обследований 1970-х – 1980-х годов признаки повреждения лесов отмечались на расстоянии до 200 км к югу от Норильска – до р. Курейка [Космические…, 1998].

Рассматриваемая карта, охватившая районы на меньшем расстоянии от Норильска, – до 70 км, – показывает, что даже небольшие отклонения от направления основного ветрового потока сказываются на результатах воздействия загрязнения, что было продемонстрировано экспозиционными профилями ЮЮВ и ВЮВ. Это воздействие наиболее четко проявляется на пологих северо-восточных и восточных склонах хребта Лонтокойский камень, огибаемых дымовым потоком от Норильска. Именно здесь удалось проследить смену типов растительности, заместивших леса на разном расстоянии от комбината – сплошное распространение каменистых и травянистых техногенных пустошей на расстоянии до 20–25 км, замещение лесов кустарничковой тундрой, вначале деградированной, на расстоянии 25–30 км, а затем типичной кустарничковой тундрой на удалении 30–50 км; сочетание участков сохранившихся поврежденных лесов с кустарниковыми тундрами, заместившими погибшие леса, на расстоянии 50–60 км. Этому сопутствует расширение площадей кустарников в связи с потеплением.

В северо-западном направлении, доля ветров которого также существенна (12 %), свободный коридор образует широкая долина р. Норильской. В этом направлении каменистые и травянистые пустоши полностью занимают территорию на расстоянии 10 км от комбината; далее на расстоянии 10–20 км они сочетаются с деградированными кустарничковыми тундрами, заместившими погибшие леса. Но на большем удалении, где за пределами долины Норильской, на равнинах Енисей-Пясинского междуречья, сомкнутых лесов, как таковых, не было, а тундры сочетались с пятнами кустарников и редколесий, загрязнение вызвало повреждение кустарниковых и типичных тундр на расстоянии до 35 км, далее которого заметное воздействие загрязнения в этом направлении не прослеживается. Таким образом, в направлении СЗ мы имеем в принципе тот же набор замещений, что и в ЮВ, но не полный, а усеченный, и распространяются эти замещения на меньшие расстояния.

Направленные вкрест этой основной оси СЗ-ЮВ ветры восточного, северо-восточного, северного направлений редки (3–7 %), загрязнение по этим направлениям далеко не распространяется, быстро сходит на нет. Закономерности, которые удалось выявить при его заметном распространении, сохраняются, но «сжимаются» в пространстве, и зоны последовательной трансформации растительности на коротком расстоянии сменяют одна другую, что четко показано на примере района 20.

В западном, юго-западном направлениях пространственная картина смен растительности, обусловленная ветровым режимом, нарушается в связи с распространением на этих территориях других источников воздействия, кроме дымов Норильска – угольных шахт и отвалов Кайеркана, предприятий Надежды с отстойниками и пульпопроводами. Тем не менее распространение аэротехногенных пустошей ограничивается в этом направлении зоной 10 км, а на удалении до 35 км отмечается лишь слабое нарушение естественных ландшафтов.

Особенности изменений растительности в зонах ее различной аэротехногенной трансформации в современных условиях потепления климата

Развитие растительности, повсеместно обнаруживаемое при потеплении климата в северных районах, как оказалось, проявляется по-разному в зонах различной трансформации растительности, вызванной аэротехногенным загрязнением.

В зонах, где на месте погибших лесов сформировались каменистые и травянистые техногенные пустоши, появление новой травянистой и кустарниковой растительности четко приурочено к водотокам, вдоль которых развиваются прирученйковые ивняковые тальниковые осоково-хвощевые зеленомошные заросли.

В зонах, где погибшие леса замещены кустарничковыми тундрами, кустарниковые заросли, в основном ивовые, появляются в ложбинах и приозерных котловинах, в понижениях рельефа, лучше защищенных от ветровых потоков, более влагообеспеченных и с лучшими условиями растепления многолетнемерзлых пород.

В зонах частичной гибели лесов, где сохранившиеся участки леса чередуются с участками тундровой растительности, появление новых зарослей кустарников, мелколе-

сий и редин не ограничивается ложбинами, они распространяются и на плакорные местообитания, а к ивовому добавляется и лиственничное возобновление.

За пределами рассмотренных зон промышленного воздействия естественные ландшафты также испытывают общее позеленение, для них характерно сгущение древостоя, увеличение сомкнутости существовавших лесов и появление новых участков редин.

ВЫВОДЫ

Проблема судьбы природных ландшафтов при промышленном освоении северных территорий, гибель лесов в результате аэротехногенного загрязнения, особенно сильно проявившаяся при работе медно-никелевых комбинатов на Кольском полуострове и в районе Норильска, всегда привлекала внимание географов и экологов. На протяжении длительной – с 1935 г. – работы Норильского горно-металлургического комбината к его губительному воздействию обращались неоднократно, краткий обзор таких исследований дан в начале статьи. Однако картографическая фиксация и оценка состояния растительности, предпринимавшаяся в 1990-х гг. при использовании передовых на те времена технологий, не позволяла по одиночным снимкам со спутника Landsat с разрешением 30 м прослеживать ход изменений. Основательные исследования ученых Сибирского отделения РАН в первом десятилетии XXI века с многолетними наблюдениями на эталонных участках (к которым мы неоднократно обращались в данной статье), при пространственном представлении результатов ограничились схемами зон с разной степенью деградации ландшафтов, но без характеристики происходящих изменений растительности.

В настоящей работе представлена детальная карта состояния растительности Норильского промышленного района, впервые отразившая замещение погибших лесов вторичными растительными сообществами, передающая пространственные закономерности такого замещения. Это оказалось возможным благодаря применению новых более совершенных материалов космической съемки – снимков со спутника Sentinel, характеризующихся высоким пространственным (10 м), спектральным (12 каналов) и временным (через 5 суток) разрешением – и современных технологий их хранения и обработки с помощью облачной платформы Google Earth Engine, позволяющей работать с большими массивами данных. В нашем случае использованы все снимки за сезоны вегетации в течение 7-летнего периода 2015–2021 гг.

Разработанная оригинальная методика обработки данных космической съемки позволила составить детальную карту, на которой впервые оказались отображенными последовательные ряды замещения погибших лесов вначале кустарниковыми и кустарничковыми тундрами, затем их деградированными вариантами, и наконец травянистыми и каменистыми пустошами. Чтобы выявить пространственные закономерности такого замещения, потребовалось разработать методику анализа карты, предусматривающую выявление однотипных мозаик контуров и районов с близким характером воздействия на ландшафты, объединение их в экспозиционные профили в соответствии с преобладающим направлением ветров, и анализ рядов замещения на разном направлении и удалении от комбината.

Названные ряды замещения наиболее полно проявляются в юго-восточном направлении, где на расстоянии от Норильска 20–25 км распространены сплошные каменистые и травянистые пустоши, на расстоянии 25–30 км леса замещены деградированной кустарничковой тундрой, а 30–50 км – типичной кустарничковой тундрой, и на расстоянии 50–60 км участки сохранившихся поврежденных лесов сочетаются с кустарниковыми тундрами. Эти закономерности замещения сохраняются и по другим направлениям, но зоны последовательной трансформации лесов сменяют одна другую на коротком расстоянии. Зоны полного уничтожения растительности – травянистые пустоши на месте погибших лесов – распространены на расстоянии от 3 км к СВ до 10–15 км к СЗ и З и до 25 км к ЮВ от Норильска. Наблюдаемое при современном потеплении климата развитие растительности неодинаково в различных зонах замещения погибших лесов.

Создание карты, визуально отображающей ряды замещения погибших лесов вторичными растительными сообществами, и показывающей развитие при потеплении кустарниковой растительности, а также выявление по этой карте пространственных закономерностей динамики замещения, мы рассматриваем как новый шаг в решении этой проблемы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность О.В. Тутубалиной за организацию полевых работ в Норильском регионе и методическое руководство при составлении карты.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to O.V. Tutubalina for organizing field work in the Norilsk region and for methodological guidance in compiling the map.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горшков С.П.* Ландшафтно-геоэкологическое картографирование Норильского района экологического бедствия. Изменение природной среды. Глобальный и региональный аспекты. Под ред. А.Н. Геннадиева и Е.В. Милановой. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 148–161.
2. *Железный О.М., Тутубалина О.В., Кравцова В.И.* Оценка изменений растительности Норильского промышленного района по дистанционным данным на основе анализа трендов спектральных индексов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2022. Т. 19, № 1. С. 170–178.
3. *Капица А.П., Голубева Е.И., Кравцова В.И., Краснушкин А.В., Спектор В.А., Рис У.Г., Тутубалина О.В.* Методология диагностики состояния антропогенно трансформированных экосистем Арктики – в кн.: Территориальные системы природопользования. Анализ и синтез. М.: Изд. МГУ. 2001. С. 113–127.
4. *Кирдянов А.В., Мыглан В.С., Пименов А.В., Кнорре А.А., Экарт А.К., Ваганов Е.А.* Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 945–952.
5. *Ковалев Б.И.* Мониторинг состояния лесов в условиях аэротехногенного воздействия Норильского промышленного района. Лесное хозяйство, 1994. № 3. С. 42–45.
6. *Корец М.А., Рыжкова В.А., Данилова И.В.* Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 887–902.
7. Космические методы геоэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 104 с.
8. *Мельников Ю.О., Ржаницын П.В., Яковлев А.О.* Геолого-экологическое картирование масштаба 1:1 000 000 Норильского района, лист R-45-B, Г в 1991-1995 гг. Норильск: Норильская комплексная геолого-разведочная экспедиция, АО «Норильский горно-металлургический комбинат им. А.П. Завенягина», РАО «Норильский Никель», 1996.
9. *Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трофимова О.В., Данилова И.В.* Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 1025–1037.
10. *Пименов А.В., Ефимов Д.Ю., Первунин В.А.* Топо-экологичесая дифференциация растительности в Норильском промышленном районе. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 923–931.
11. *Тутубалина О.В.. Голубева Е.И., Зимин М.В., Кравцова В.И., Михайлов Н.В., Железный О.М.* Картографирование состояния растительного покрова в окрестности г. Норильска с помощью Google Earth Engine. Материалы Восемнадцатой всероссийской открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 16-20 ноября 2020 г. ИКИ РАН 2020. С. 373.
12. *Филипчук А.Н., Ковалев Б.И.* Динамика усыхания предтундровых лесов в Норильском промышленном районе. Межд. симп. «Северные леса: состояние, динамика, антропогенное воздействие» (Москва, 16-26 июля 1990 г.). М.: 1990. С. 29–37.

13. *Харук В.И., Винтерберг К., Цыбульский Г.М., Яхимович А.П., Мороз С.Н.* Техногенное повреждение притундровых лесов Норильской долины. Экология, 1996. №6. С.424–429.
14. *Шишикин А.С., Абаимов А.П., Онучин А.А.* Методология и принципы организации исследований природных экосистем в регионах с экстремальным техногенным воздействием. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 863–871.
15. *Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C., Hurtmans D., Coheur P.-F*. IASI observations of sulfur dioxide (SO2) in the boundary layer of Norilsk. J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119. P. 4253– 4263.
16. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R*. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
17. *Shabanov, N.V., Marshall, G.J., Rees, W.G., Bartalev, S.A., Tutubalina, O.V. and Golubeva, E.I.* 2021. Climate-driven phenological changes in the Russian Arctic derived from MODIS LAI time series 2000-2019. *Environmental Research Letters.* 2021. Vol. 16. No. 8. 1084009.
18. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M*. Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. Advances in Space Research. 2008. Vol. 41. P. 36–40.
19. *Toutoubalina O.V., Rees W.G.* Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. International Journal of Remote Sensing., 1999. Vol. 20. P. 2979–2990.
20. *Tutubalina O., Rees G*. Phenological differences in vegetation near Noril'sk, North-Central Siberia, in the context of airborne pollution and climate change. UK Arctic Science Conference 2022. Durham University, 11-13 April. Abstracts. P. 19.

REFERENCES

1. *Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C., Hurtmans D., Coheur P.-F*. IASI observations of sulfur dioxide (SO2) in the boundary layer of Norilsk. J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119. P. 4253– 4263.
2. *Filipchuk A.N., Kovalev B.I*. Dynamics of shrinkage of pre-tundra forests in the Norilsk industrial region. Int. symp. "Northern forests: state, dynamics, anthropogenic impact" (Moscow, July 16-26, 1990). Moscow: 1990. P. 29–37. (in Russian).
3. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R*. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
4. *Gorshkov S.P.* Landscape and geoecological mapping of the Norilsk region ecological disaster. Changing the natural environment. Global and regional aspects. Ed. A.N. Gennadiev and E.V. Milanova. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1997. P. 148–161. (in Russian).
5. *Kapitsa A.P., Golubeva E.I., Kravtsova V.I., Krasnushkin A.V., Spektor V.A., Ris U.G., Tutubalina O.V.* Methodology for diagnosing the state of anthropogenically transformed ecosystems in the Arctic - in the book: Territorial systems of nature management. Analysis and synthesis. Moscow: Publishing House of Moscow State University. 2001, P. 113–127. (in Russian).
6. *Kharuk V.I., Vinterberg K., Tsybulsky G.M., Yakhimovich A.P., Moroz S.N.* Technogenic damage to the tundra forests of the Norilsk Valley. Ecology, 1996. No. 6. P. 424–429. (in Russian).
7. *Kirdyanov A.V., Myglan V.S., Pimenov A.V., Knorre A.A., Ekart A.K., Vaganov E.A.* Dynamics of drying out of Siberian larch in the zone of influence of technogenic emissions from enterprises of the Norilsk industrial region. Siberian Ecological Journal, 2014. No. 6. P. 945–952. (in Russian).
8. *Korets M.A., Ryzhkova V.A., Danilova I.V.* Using GIS to assess the state of terrestrial ecosystems in the Norilsk industrial region. Siberian Ecological Journal, 2014. No. 6. P. 887–902. (in Russian).

9. *Kovalev B.I*. Monitoring the state of forests under the conditions of aerotechnogenic impact of the Norilsk industrial region. Forestry, 1994. No. 3. P. 42–45. (in Russian).
10. *Melnikov Yu.O., Rzhanitsyn P.V., Yakovlev A.O.* Geological and ecological mapping of the scale 1:1,000,000 of the Norilsk region, sheet R-45-B, G in 1991–1995. Norilsk: Norilsk Integrated Geological Exploration Expedition, Norilsk Mining and Metallurgical Plant named after A.P. Zavenyagin", RAO "Norilsk Nickel", 1996. (in Russian).
11. *Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trofimova O.V., Danilova I.V*. Pollution of the snow cover in the impact zone of the enterprises of the Norilsk industrial region. Siberian Ecological Journal, 2014. No. 6. P. 1025–1037. (in Russian).
12. *Pimenov A.V., Efimov D.Yu., Pervunin V.A*. Topo-ecological differentiation of vegetation in the Norilsk industrial region. Siberian Ecological Journal, 2014. No. 6. P. 923–931. (in Russian).
13. Space methods of geoecology. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1998. 104 p. (in Russian).
14. *Shabanov, N.V., Marshall, G.J., Rees, W.G., Bartalev, S.A., Tutubalina, O.V. and Golubeva, E.I.* 2021. Climate-driven phenological changes in the Russian Arctic derived from MODIS LAI time series 2000-2019. *Environmental Research Letters.* 2021. Vol. 16. No. 8. 1084009.
15. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M*. Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. Advances in Space Research. 2008. Vol. 41. P. 36–40.
16. *Shishikin A.S., Abaimov A.P., Onuchin A.A*. Methodology and principles of organizing studies of natural ecosystems in regions with extreme anthropogenic impact. Siberian Ecological Journal, 2014. No. 6. P. 863–871. (in Russian).
17. *Toutoubalina O.V., Rees W.G.* Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. International Journal of Remote Sensing., 1999. Vol. 20. P. 2979–2990.
18. *Tutubalina O.V., Golubeva E.I., Zimin M.V., Kravtsova V.I., Mikhailov N.V., Zhelezny O.M.* Mapping the state of vegetation in the vicinity of the city of Norilsk using Google Earth Engine. Proceedings of the Eighteenth All-Russian Open Conference with international participation "Modern problems of remote sensing of the Earth from space" November 16-20, 2020. IKI RAS 2020. P. 373. (in Russian).
19. *Tutubalina O., Rees G*. Phenological differences in vegetation near Noril'sk, North-Central Siberia, in the context of airborne pollution and climate change. UK Arctic Science Conference 2022. Durham University, 11-13 April. Abstracts. P. 19.
20. *Zheleznyy O.M., Tutubalina O.V., Kravtsova V.I.* Estimation of changes in the vegetation of the Norilsk industrial region from remote data based on the analysis of trends in spectral indices. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2022. Vol. 19, No. 1. P. 170–178. (in Russian).